

بررسی مشخصات هیدرولیکی جریان در سرریزهای خط جریانی

سارا باقری^۱، عبدالرضا کبیری سامانی^{۲*}

۱- دانشجوی دکترای مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

akabiri@cc.iut.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۰۲/۳۱]

تاریخ دریافت: [۹۵/۰۸/۲۲]

چکیده

هدف از این پژوهش، مطالعه تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی جریان روی سرریزهای خط جریانی است. با توجه به اهداف پژوهش و برای ارزیابی نتایج مدل‌سازی‌های عددی حاصل از نرم‌افزار متن‌باز OpenFoam، مدل‌های آزمایشگاهی سرریزهای خط جریانی بر اساس تابع تبدیل ژوکوفسکی طراحی و در آزمایشگاه مطالعه شدند. با بررسی نتایج مدل‌های آشفتگی متفاوت، مدل $k-\omega$ SST به‌عنوان بهترین مدل آشفتگی، در شبیه‌سازی جریان عبوری از روی سرریزهای خط جریانی انتخاب شد. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی به‌ازای دبی‌های مختلف و ویژگی‌های هندسی متفاوت، نشان داد که با افزایش دبی جریان و نیز افزایش میزان خروج از مرکزیت نسبی در رابطه ژوکوفسکی، سرعت روی تاج سرریز خط جریانی افزایش و به تبع آن فشار در این محل کاهش می‌یابد. بر این اساس کم‌ترین فشار و در نتیجه بیشترین احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون مربوط به سرریز تاج‌دایره‌ای (نوعی سرریز خط جریانی با خروج از مرکزیت واحد) است. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین تنش‌های برشی بستر و نیروهای فشاری در پایین‌دست سرریزهای تاج‌دایره‌ای رخ می‌دهند و در مقایسه با سایر سرریزهای خط جریانی، بیشترین امکان فرسایش مربوط به پایین‌دست سرریزهای تاج‌دایره‌ای است. دلیل این امر وقوع امواج ضربه‌ای، کاهش عمق و افزایش سرعت جریان در پایین‌دست سرریزهای تاج‌دایره‌ای است. علاوه بر این، کم‌ترین مقادیر تنش‌های برشی بستر در بالادست سازه، مربوط به سرریزهای تاج‌دایره‌ای، و در نتیجه این نوع سرریز نسبت به سایر انواع سرریزهای خط جریانی مستعد رسوب‌گذاری در بالادست خود است. پس براساس نتایج حاصل، بهره‌گیری از سایر انواع سرریزهای خط جریانی با انحنای مناسب، می‌تواند مشکلات رایج در سرریزهای تاج‌دایره‌ای را مرتفع سازد.

واژگان کلیدی: سرریز خط جریانی، تبدیل ژوکوفسکی، نرم‌افزار OpenFoam، نیم‌رخ سرعت، توزیع فشار.

۱- مقدمه

محیط پیرامون خود داشته باشد تا بتواند کلیه اهداف مورد نظر در طرح را تأمین کند. سرریزها از جنبه‌های مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند. یکی از مهم‌ترین موارد در تقسیم‌بندی سرریزها، ضخامت تاج سرریز است. بر این اساس سرریزها در سه گروه، سرریزهای لبه‌تیز، لبه‌باریک و لبه‌پهن تقسیم‌بندی می‌شوند. ضخامت تاج سبب می‌شود که توزیع فشار و سرعت بر روی تاج سرریز و به تبع آن رفتار سرریزها متفاوت باشد [1].

سرریزها یکی از انواع سازه‌های هیدرولیکی استفاده شده در سیستم‌های انتقال آب و شبکه‌های آبیاری هستند که به‌منظور دست‌یابی به اهدافی مانند؛ افزایش عمق جریان در بالادست سازه برای آبیگری، اندازه‌گیری دبی جریان، انحراف و یا خروج آب اضافی موجود در کانال‌ها و دریاچه سدها به‌کار می‌روند. این سازه دارای انواع گوناگونی است و سرریزی که انتخاب می‌شود، باید بیشترین هماهنگی را با شرایط موجود و

همچنین نتایج آزمایش‌های آنها در شرایط جریان مستغرق نشان داد که حد استغراق در سرریزهای خط جریانی بیش از ۸۰ درصد است و این حد با کاهش ارتفاع سرریز افزایش می‌یابد [10].

هدف از مطالعه حاضر نیز بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی جریان عبوری از روی سرریزهای خط جریانی در شرایط جریان آزاد و با بهره‌گیری از مدل‌سازی‌های تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی است.

۲- روش انجام تحقیق

۲-۱- طراحی سرریز خط جریانی (هیدروفویل)

مقطع بال که در علم آیرودینامیک به ایرفویل و در علوم آب به هیدروفویل موسوم است را می‌توان به‌عنوان یک شکل هدایت‌کننده جریان که معمولاً از دو سطح قوس‌دار که طول آن نسبت به ارتفاعش بیشتر است، تعریف کرد. هنگامی که چنین مقطعی در مسیر جریان سیال قرار می‌گیرد، تغییرات چندانی در مسیر جریان اصلی ایجاد نمی‌کند. پس نیروهای اعمال شده نسبت به اجسام ضخیم، کم‌تر و تنها شامل اصطکاک و اختلال‌های موضعی ایجاد شده در نزدیکی مقطع است [11].

مقاطع بال اهمیت زیادی در کاربردهای علمی و مهندسی اعم از هواپیماها، بالگردها، کشتی‌ها، قایق‌ها، کمپرسورها، توربین‌ها، فن‌ها، پمپ‌ها، پره‌های هادی، آسیاب‌ها و کانال‌های هیدرولیکی دارند. گروه‌های مختلفی از مقاطع بال توسط سازمان‌ها و مراکز تحقیقاتی مختلفی ارائه شده‌اند که بسیاری از آنها حاصل محاسبات عددی و یا فعالیت‌های تجربی هستند، اما در این مطالعه از تئوری ارائه شده به وسیله ژوکوفسکی^۱ برای طراحی سرریزهای مورد بحث استفاده می‌شود. این تبدیل که یک تبدیل هم‌دیس است، به وسیله یک دانشمند روسی به نام نیکولای ژوکوفسکی و به‌منظور طراحی شمای یک ایرفویل ایده‌آل از مقطع یک دایره ارائه شده است. در صورتی که معادله یک دایره با شعاع r در صفحه Z به‌صورت زیر تعریف شود:

در سرریزهای لبه‌باریک انحناى خطوط جریان قابل توجه است و بنابراین توزیع فشار روی تاج این سرریزها هیدرواستاتیک نیست. به‌همین دلیل بررسی جریان در بالای تاج چنین سرریزهایی نیازمند الگوهای پیچیده‌تری است و در بیشتر موارد باید از مدل‌های هیدرولیکی استفاده شود. سرریزهای لبه‌باریک دارای انواع متفاوتی هستند که از مشهورترین آنها می‌توان به سرریزهای تاج‌دایره‌ای و سرریزهای لبه‌آبریز (اوجی) اشاره نمود. سرریزهای خط جریانی نیز نوع خاصی از سرریزهای لبه‌باریک هستند که در طراحی آنها از تئوری بال‌ها استفاده شده است (شکل ۱). این سرریزها به‌علت دارا بودن مقطع خط جریانی، دارای ضریب دبی بالایی بوده و نسبت به سایر انواع سرریزها اغتشاش کمتری را در مسیر جریان ایجاد کرده و از حد استغراق و پایداری بیشتری برخوردار هستند.

شکل ۱. نمایی از سرریز خط جریانی

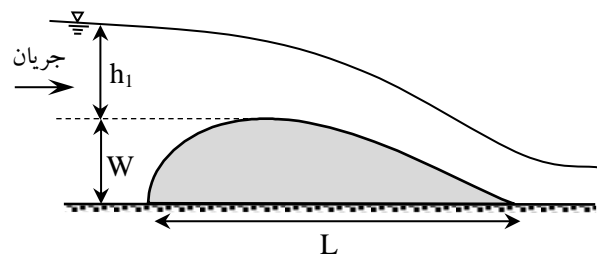


Fig. 1. Schematic view of a streamlined weir

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه انواع سرریزهای لبه‌باریک و بال‌الخص سرریزهای تاج‌دایره‌ای و لبه‌آبریز صورت گرفته است [2-9]. باوجود بررسی‌های گسترده‌ای که در زمینه انواع سرریزهای لبه‌باریک صورت گرفته، تاکنون مطالعات چندانی در زمینه سرریزهای خط جریانی انجام نشده است. مطالعات لاکش‌مانا راتو و جاگانادا راتو در هندوستان را می‌توان اولین پژوهش منتشرشده در زمینه سرریزهای خط جریانی دانست [10]. آنها ویژگی‌های جریان در چهار مدل سرریز خط جریانی، که بر اساس تبدیل ژوکوفسکی طراحی شده بودند و یک سرریز نیم‌استوانه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس مشاهده آنها، احتمال وقوع فشارهای منفی در سرریزهای نیم‌استوانه‌ای بسیار بیشتر از سرریزهای خط جریانی است.

یکی از پارامترهای مهم در تبدیل ژوکوفسکی، پارامتر خروج از مرکزیت نسبی (λ) است که به صورت نسبت خروج از مرکزیت به شعاع دایره بیان می‌شود:

$$\lambda = \frac{c}{r} \quad (5)$$

۲-۲- مدل سازی آزمایشگاهی

در این پژوهش به منظور ارزیابی نتایج مدل سازی‌های عددی، ۴ مدل آزمایشگاهی سرریز خط جریان با شعاع تاج مرجع ۲۰ سانتی متر و خروج از مرکزیت‌های نسبی ۰/۱۲۵، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ مطالعه آزمایشگاهی شدند.

برای ساخت مدل‌های آزمایشگاهی، نیم رخ طولی تمامی مدل‌ها در نرم افزار AutoCAD ترسیم شد. سپس با استفاده از دستگاه برش لیزر، طرح‌های ترسیم شده روی ورق آهن اجرا شدند. در این شرایط باید برای هر مدل دو مقطع طولی ایجاد شود. دو مقطع یاد شده توسط میله‌هایی با طولی برابر با عرض کانال آزمایشگاهی به یکدیگر متصل شدند و در نهایت روی سازه با استفاده از ورق آهن گالوانیزه پوشانده شد. برای برداشت نیم رخ تغییرات فشار وارد شده بر کف سازه، سوراخ‌هایی با قطر ۲ میلی متر در خط مرکزی سازه و با فواصل مشخص ایجاد شد. سپس در زیر هر سوراخ یک پایه پیژومتر با استفاده از چسب آهن نصب و لوله پیژومتر به آن متصل شد. مدل‌ها در کانال آزمایشگاهی با طول ۱۱ متر، عرض ۰/۴ متر و ارتفاع ۰/۷ متر مستقر شدند و توسط چسب آکواریوم آب بندی شدند. نمایی از مدل‌های ساخته شده در شکل (۲) نشان داده شده است.

به منظور اندازه گیری دبی جریان از یک فلومتر الکترومغناطیس با دقت اندازه گیری ۰/۵ درصد، برای تعیین عمق جریان عبوری در کانال از یک عمق سنج مکانیکی با دقت یک میلی متر و قابلیت حرکت در سه بعد و برای برداشت نیم رخ‌های سرعت از دستگاه سرعت سنج صوتی (ADV) استفاده شد.

$$z = r e^{i\theta} = r (\cos \theta + i \sin \theta) \quad (1)$$

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$$

معادله تبدیل ژوکوفسکی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$w = z + \frac{\kappa^2}{z} \quad (2)$$

در روابط فوق، $w = \zeta + i\eta$ متغیر مختلط در صفحه جدید و $z = x + iy$ یک متغیر مختلط در صفحه اصلی است. پارامترهای x ، y ، ζ و η اعداد حقیقی و i یکه موهومی با ویژگی $i^2 = -1$ هستند و پارامتر ثابت تبدیل κ نیز به منظور کنترل میزان کشیدگی استفاده می‌شود. هرچه مقدار این پارامتر به شعاع دایره نزدیک تر باشد، ضخامت مقطع حاصل کمتر خواهد بود و برای $\kappa = r$ یک خط مستقیم از $-\gamma r$ تا γr به وجود می‌آید. با استفاده از تعاریف بیان شده، مقادیر ζ و η در صفحه w بر حسب مقادیر معلوم x و y به صورت زیر حاصل می‌شوند:

$$\zeta = \frac{x(x^2 + y^2 + \kappa^2)}{x^2 + y^2} = x \left(1 + \frac{\kappa^2}{x^2 + y^2}\right)$$

$$\eta = \frac{y(x^2 + y^2 - \kappa^2)}{x^2 + y^2} = y \left(1 - \frac{\kappa^2}{x^2 + y^2}\right) \quad (3)$$

ویژگی‌های ایرفویل حاصل از تبدیل ژوکوفسکی وابسته به شعاع و میزان خروج از مرکزیت دایره اصلی است. در صورتی که دایره در مرکز مختصات واقع شده باشد و یا به عبارتی خروج از مرکزیت آن صفر باشد، نتیجه تبدیل یک بیضی در صفحه w خواهد بود و در شرایطی که دایره دارای خروج از مرکزیت در راستای x باشد، یک جسم دوکی شکل متقارن ایجاد می‌شود. همچنین، در صورت وجود خروج از مرکزیت در راستای y نیم رخ جسم حاصل غیر متقارن خواهد بود [12]. در صورتی که مختصات خروج از مرکز دایره در صفحه Z با c نشان داده شود، به منظور دستیابی به یک مقطع بال مناسب، ثابت تبدیل κ مطلوب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\kappa = r - |c| \quad (4)$$

شکل ۲. نمایی از مدل‌های ساخته شده



Fig. 2. Schematic view of the experimental models

۲-۳- مدل‌سازی عددی

برای تولید مش سه‌بعدی از ابزار SnappyHexMesh موجود در زیرمجموعه system این نرم‌افزار و برای ترسیم شکل سازه‌های بررسی شده از نرم‌افزار طراحی AutoCad استفاده شد. در شکل (۳) نمونه‌ای از شبکه‌بندی ایجاد شده از روش مذکور، به‌منظور حل عددی جریان از روی یک سرریز خط جریانی نشان داده شده است.

به‌منظور گسترش دامنه محاسباتی در راستای عرضی کانال، از شرط مرزی صفحه متقارن برای دیواره‌های جانبی، از شرط مرزی دیواره برای سطوح جامد، از شرط مرزی مقدار ثابت دبی در واحد عرض برای ورودی کانال و از شرط مرزی گرادیان صفر برای سطوح بالایی (اتمسفر) و خروجی کانال استفاده شد.

به‌منظور آنالیز حساسیت شبکه حاضر، تعداد مش در مدل نشان داده شده در شکل (۳)، به دو برابر افزایش یافت و نتایج هر دو شبکه با یکدیگر مقایسه شد. بر طبق این مقایسه، نتایج خروجی‌های هر دو شبکه به یکدیگر بسیار نزدیک بود که این امر نشان‌دهنده کفایت مش استفاده شده است. همچنین به منظور اطمینان از کیفیت مش استفاده شده در نزدیکی بدنه سرریز، مقدار y^+ محاسبه و در حدود ۳ الی ۵ برآورد شد. در صورتی که مقدار $y^+ = u^*y/\nu$ در محدوده بین صفر تا ۵ قرار گیرد، مش تولیدی، زیرلایه لزج را نیز پوشش خواهد داد. در رابطه یاد شده، u^* سرعت برشی، y فاصله از بستر و ν لزجت سینماتیکی سیال است [16].

امروزه با توجه به افزایش قدرت محاسبات عددی توسط رایانه‌ها و توسعه نرم‌افزارهای مرتبط با دینامیک سیالات محاسباتی، مطالعات عددی جایگزین بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی شده است. این نرم‌افزارها حجم وسیعی از داده‌های مختلف با دقت قابل قبول را که اندازه‌گیری آنها در آزمایشگاه‌ها دشوار و در پاره‌ای موارد غیرممکن است، فراهم آورده‌اند [13]. در این مطالعه برای شبیه‌سازی جریان روی سرریزهای مورد بحث از نرم‌افزار OpenFoam استفاده شد. نرم‌افزار OpenFoam، نرم‌افزاری متن باز است که به زبان ++C نگارش یافته است [14]. این نرم‌افزار شامل چندین حل‌گر از پیش نوشته شده است که برای دامنه وسیعی از مسایل پیچیده دینامیک سیالات قابل کاربرد است. در این مطالعه از حل‌گر interFoam که برای حل جریان‌های دوفازی سیالات غیرقابل تراکم و مخلوط نشدنی هم‌دما بر اساس روش جزء حجم سیال (VOF) توسعه یافته، استفاده شده است [15].

یکی از اولین گام‌ها در حل عددی معادلاتی که یک فرآیند فیزیکی را تشریح می‌کنند، تعیین هندسه مسأله و ساختن شبکه محاسباتی است. دامنه محاسباتی در این مطالعه یک مکعب مستطیل به طول ۵ متر، ارتفاع ۰/۵ متر و عرض ۰/۰۳ متر است که سرریزها در فاصله ۳/۵ متری از ابتدای این کانال قرار گرفته‌اند. برای ترسیم هندسه مسأله از ابزار blockMesh موجود در زیرمجموعه constant نرم‌افزار OpenFoam.

شکل ۳. نمونه‌ای از شبکه‌بندی ایجاد شده حول سرریز خط جریانی ($\lambda = 0.5$)

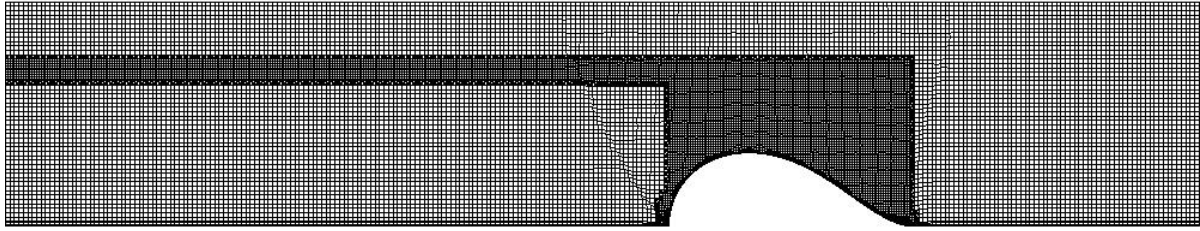


Fig. 3. Mesh generation around a streamlined weir ($\lambda = 0.5$)

۳- تحلیل نتایج

۳-۱- انتخاب مناسب‌ترین مدل آشفتگی

به منظور تعیین بهترین مدل آشفتگی در شبیه‌سازی عددی جریان عبوری از روی سرریزهای خط جریانی، از پنج مدل k-ε استاندارد، k-ε قابل درک، RNG k-ε، k-ω SST و مدل تنش رینولدز LRR استفاده شد. در این مدل‌ها، k معرف انرژی جنبشی جریان آشفته، ε معرف نرخ استهلاك انرژی جنبشی آشفته و ω معرف نرخ استهلاك مخصوص است که به صورت $\omega = \varepsilon/k$ تعریف می‌شود.

تمامی مدل‌های یاد شده به ازای یک جریان مشخص، که ویژگی‌های آن در جدول (۱) بیان شده است، شبیه‌سازی شدند. در این جدول Q دبی جریان، Y_1 ، Y_2 و Y_3 به ترتیب

اعماق جریان در بالادست، روی تاج و پایین‌دست سرریز و Fr_u و Fr_d به ترتیب اعداد فرود در بالادست و پایین‌دست سرریز هستند.

شکل (۴)، نتایج نیم‌رخ‌های سطح آب حاصل از مدل‌های عددی اجرا شده را به همراه داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، نتایج نیم‌رخ‌های سطح آب در تمامی مدل‌ها، به یکدیگر بسیار نزدیک بوده و تفاوت آنها با داده‌های آزمایشگاهی در حد چند میلی‌متر (کمتر از ۲ درصد) است. دلیل این تفاوت را نیز می‌توان به نوسان اندک در سطح جریان آب عبوری از روی مدل‌های سرریز و در نتیجه کاهش دقت داده‌برداری در آزمایشگاه نسبت داد.

جدول ۱. ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی جریان استفاده شده برای تعیین بهترین مدل آشفتگی

λ	W (cm)	Q (lit/s)	Y_1 (cm)	Y_2 (cm)	Y_3 (cm)	Fr_u	Fr_d
0.5	16.4	76.5	35.6	14.5	8.1	0.29	2.65

Table (1) Geometric and hydraulic characteristics of flow applied for selection of the best turbulence model

شکل ۴. مقایسه نیم‌رخ سطح آب اندازه‌گیری شده با نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی

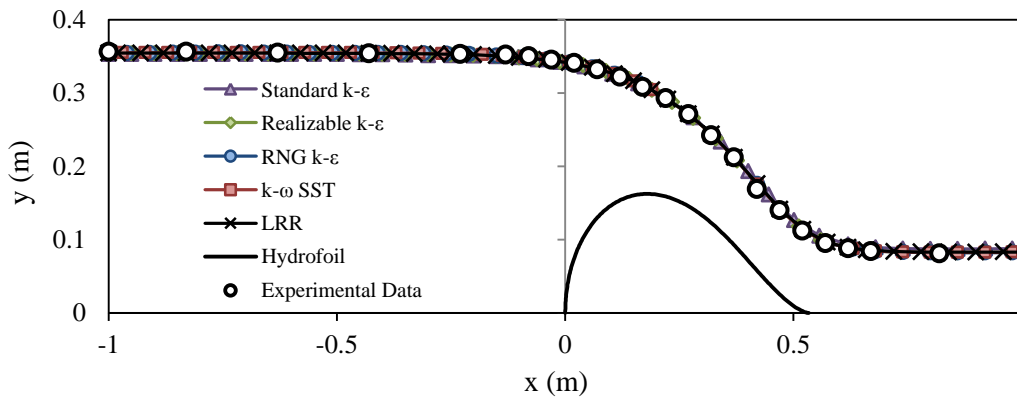


Fig. 4. Measured water surface profiles compared with the numerical results

شکل ۵. مقایسه نیمرخ فشار کف اندازه‌گیری شده در طول سازه با نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی

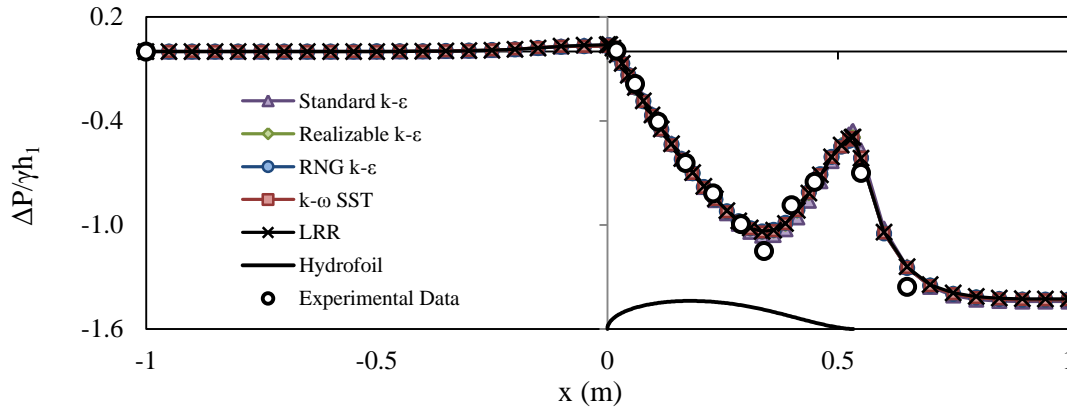


Fig. 5. Measured bed pressure profiles along the structure compared with those of the numerical modeling

شکل ۶. مقایسه نیمرخ‌های سرعت اندازه‌گیری شده با نتایج مدل‌سازی‌های عددی (الف) تاج سرریز (ب) بالادست سرریز

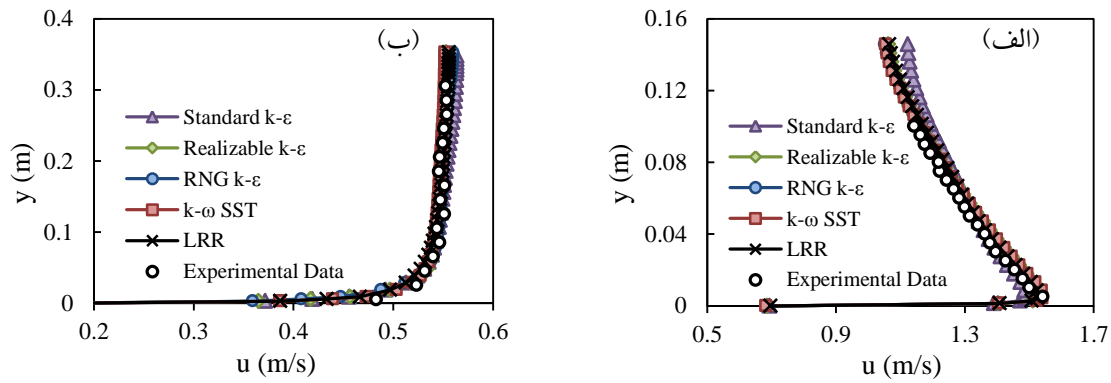


Fig. 6. Measured velocity profiles compared with the numerical results (a) weir crest and (b) upstream of the weir

و در خلاف جهت نیروی ثقل است. این امر سبب می‌شود که فشار در قسمت‌های ابتدایی سرریز کاهش یابد. اما در قسمت‌های انتهایی سرریز، انحنای خطوط جریان معکوس شده و به صورت مقعر درمی‌آید. در این شرایط نیروی گریز از مرکز با نیروی ثقل هم‌سو شده و در نتیجه فشار افزایش می‌یابد. در انتهای سرریز انحنای خطوط جریان به‌طور چشم‌گیری کاهش یافته و عمق و سرعت جریان در پایین‌دست سازه به مقدار تقریباً ثابتی می‌رسند و به تبع آن فشار نیز بلافاصله پس از سرریز به‌طور ناگهانی کاهش یافته و در نهایت مقدار ثابتی را اختیار می‌کند. مطابق شکل (۵)، تمامی مدل‌های عددی تغییرات فشار کف را به خوبی برآورد نموده‌اند.

در شکل (۶)، نتایج نیمرخ‌های سرعت حاصل از مدل‌سازی‌های عددی در مقایسه با داده‌های سرعت برداشت شده توسط دستگاه سرعت‌سنج صوتی، نشان داده شده است. با توجه به این شکل، هماهنگی خوبی بین نتایج سرعت

شکل (۵) توزیع فشار کف در طول کانال و سازه سرریز، حاصل از مدل‌سازی‌های عددی را همراه با داده‌های اندازه‌گیری شده توسط پیزومترها نشان می‌دهد. در این شکل اختلاف فشار در بالادست سازه با فشار در نقطه بررسی شده، ΔP و وزن مخصوص سیال و h_1 هد جریان موجود روی تاج سرریز است. مطابق این شکل، با نزدیک شدن جریان به سرریز، فشار به میزان اندکی افزایش می‌یابد که دلیل این امر را می‌توان به پس‌زدگی جریان در اثر حضور سرریز نسبت داد. پس از ورود جریان به محدوده سرریز، فشار به‌طور چشم‌گیری کاهش یافته و کم‌ترین فشار پس از تاج سرریز مشاهده می‌شود. سپس از نقطه کمینه فشار تا انتهای سرریز فشار افزایش و پس از آن دوباره کاهش می‌یابد تا به یک مقدار ثابت در پایین‌دست سرریز برسد. در توصیف چگونگی تغییرات این پارامتر خاطر نشان می‌شود که در ابتدای ورود جریان به سرریز، انحنای خطوط جریان عبوری از روی سرریز محدب بوده و در نتیجه نیروی گریز از مرکز رو به بالا

تأثیر تغییرات میزان خروج از مرکزیت نسبی به‌ازای یک دبی واحد ارزیابی خواهد شد.

جدول ۲. ویژگی‌های هیدرولیکی جریان‌های بررسی شده در سرریز خط جریانی با $\lambda = 0.5$

Q (lit/s)	Y ₁ (cm)	Y ₂ (cm)	Y ₃ (cm)	Fr _u	Fr _d
100	38.6	17.5	10.6	0.33	2.31
70	34.5	14.2	7.7	0.28	2.61
40	29.5	10.1	4.8	0.20	3.04
10	21.9	4.3	1.6	0.08	3.94

Table 2. Hydraulic characteristics of flow over a streamlined weir with $\lambda = 0.5$

نیم‌رخ‌های سطح جریان عبوری از روی سرریز خط جریانی با $\lambda = 0.5$ به‌ازای چهار دبی بررسی شده، در شکل (۷) نشان داده شده است. در این شکل عمق جریان در هر نقطه به‌وسیله عمق جریان در بالادست سرریز (Y_1) و فاصله هر نقطه از ابتدای سرریز به‌وسیله طول سازه (L) بی‌بعد شده است.

با استفاده از مقادیر عمق‌های جریان حاصل، میزان عدد فرود در هر نقطه محاسبه و نمودارهای تغییرات این عدد بی‌بعد در شکل (۸) ترسیم شده است. با توجه به این شکل، مشهود است که جریان در بالادست سرریز زیربحرانی است ($1 < Fr$)، اما در نقطه شروع سرریز، جریان شتاب گرفته و عدد فرود افزایش می‌یابد تا این‌که در یک نقطه واقع در نزدیکی تاج سرریز جریان به‌صورت بحرانی ($Fr = 1$) درمی‌آید. پس از نقطه بحرانی، جریان مسیر خود را به صورت فوق‌بحرانی ($Fr > 1$) در پایین‌دست سرریز ادامه می‌دهد، مگر آن‌که به‌علت وجود سازه دیگری در مسیر جریان و یا افت انرژی جریان پس از طی مسیری طولانی، با ایجاد یک پرش هیدرولیکی از حالت فوق‌بحرانی به زیربحرانی تبدیل شود. نکته قابل توجه در شکل (۸) وقوع نقطه بحرانی در $0.3L = x$ به‌ازای تمامی دبی‌های بررسی شده است. به‌طور کلی میزان تغییرات محل وقوع نقطه بحرانی با دبی جریان بسیار اندک است، به طوری که می‌توان آن را مستقل از دبی جریان دانست.

حاصل از تمامی مدل‌ها با داده‌های آزمایشگاهی مشاهده می‌شود و اختلاف سرعت‌ها به کمتر از ۵ درصد محدود می‌شود. با این وجود، سرعت‌های محاسبه شده توسط مدل k-ε استاندارد نسبت به سایر مدل‌ها از دقت کمتری برخوردار است. بر اساس نتایج، بیشینه تفاوت سرعت‌ها برای مدل k-ε استاندارد در حدود ۵ درصد و برای سایر مدل‌ها کمتر از ۲ درصد است.

بر اساس مطالب ارائه شده، نتایج تمامی مدل‌های عددی در شبیه‌سازی جریان روی سرریزهای خط جریانی به یکدیگر نزدیک هستند و حتی خطای مدل k-ε استاندارد نیز در برآورد مقادیر سرعت جریان روی تاج سرریز، چندان قابل توجه نیست. در نتیجه با توجه به سرعت همگرایی مدل‌های اجرا شده و توصیه‌های موجود در مورد هریک از مدل‌ها، در این مطالعه از مدل k-ω SST برای شبیه‌سازی‌های آتی استفاده شد. شایان ذکر است که این مدل برای رفع حساسیت مدل k-ω استاندارد در جریان‌های آزاد توسعه یافته است. در مدل k-ω SST از فرمول‌بندی مدل k-ω استاندارد در نواحی نزدیک به دیوار و از مدل k-ε به سمت مرز جریان آزاد استفاده شده است. در این مدل تعریف لزجت آشفتگی برای محاسبه انتقال تنش برشی آشفتگی اصلاح شده است. همچنین علاوه بر اصلاح ثوابت در مدل k-ω SST، این مدل دارای یک جمله استهلاک انتشار جانبی در رابطه ω است. این تغییرات سبب شده است که مدل k-ω SST برای دامنه وسیعی از جریان‌ها، نظیر؛ جریان با گرادیان فشار معکوس، ایرفویل‌ها و امواج شوک فراصوتی، نسبت به مدل‌های k-ε استاندارد و k-ω استاندارد دقیق‌تر و قابل اطمینان شود [17].

۳-۲- تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی

در ابتدای این بخش، به‌منظور بررسی تأثیر میزان دبی جریان بر عمل‌کرد سرریزهای مطالعه شده، رفتار یک سرریز خط جریانی مشخص با خروج از مرکزیت نسبی ۰/۵، به‌ازای چهار دبی مختلف ارزیابی شد.

ویژگی‌های جریان‌های یاد شده در جدول (۲) ارائه شده است. در ادامه تأثیر شکل سازه خط جریانی و یا به‌عبارتی

شکل ۷. نیمرخ‌های بی‌بعد سطح آب به ازای دبی‌های مختلف در سرریز خط جریانی با $\lambda = 0.5$

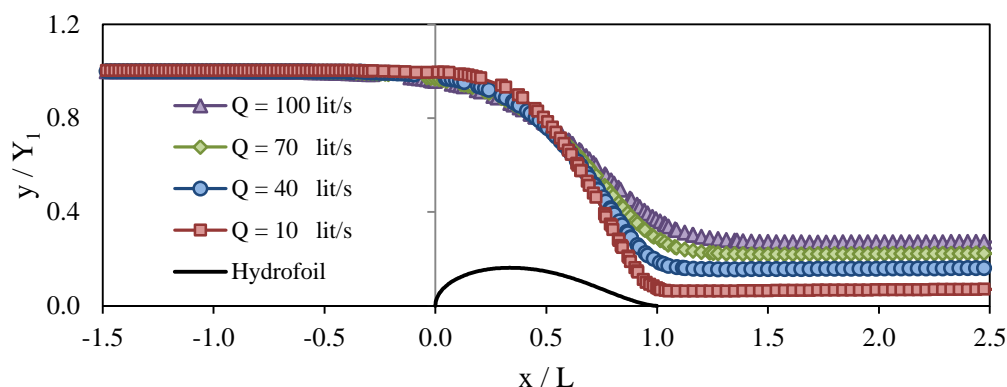


Fig. 7. Dimensionless water surface profiles for a streamlined weir with $\lambda = 0.5$, considering various flow discharges

شکل ۸. نیمرخ‌های تغییرات عدد فرود به ازای دبی‌های مختلف در سرریز خط جریانی با $\lambda = 0.5$

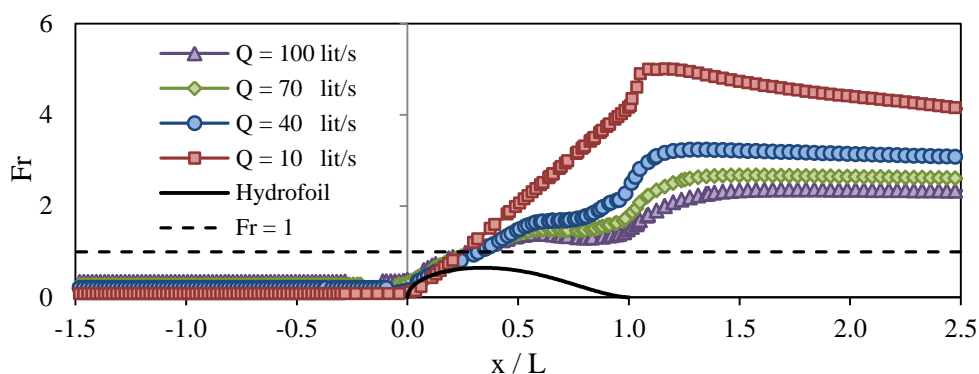


Fig. 8. Variation of Froude number for a streamlined weir with $\lambda = 0.5$, for different flow discharges

شکل ۹. نیمرخ‌های بی‌بعد فشار کف به ازای دبی‌های مختلف در سرریز خط جریانی با $\lambda = 0.5$

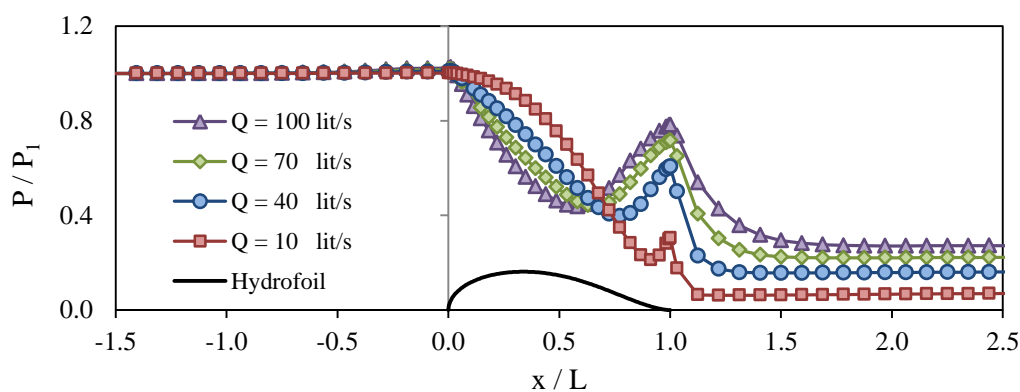


Fig. 9. Dimensionless bed pressure profiles for a streamlined weir with $\lambda = 0.5$, considering various flow discharges

تاج منتقل می‌شود. همان‌گونه که پیش‌تر نیز یاد شد، پس از نقطه وقوع کمینه فشار، مقادیر فشار تا انتهای سرریز افزایش یافته و پس از انتهای سرریز دوباره کاهش می‌یابد. در پایین‌دست سازه، به‌علت ثابت بودن تقریبی عمق و سرعت جریان، فشار وارد بر کف نیز تقریباً ثابت می‌ماند.

در شکل (۹) نیمرخ‌های بی‌بعد تغییرات فشار در کف کانال و سرریز نشان داده شده است. با ورود جریان به محدوده سرریز و افزایش شتاب و سرعت جریان، میزان فشار وارد بر کف سازه به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. این کاهش فشار تا بعد از تاج سرریز ادامه یافته و هرچه میزان دبی جریان کمتر می‌شود، نقطه کمینه فشار نیز به فواصل دورتر از

پس از سرریز مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر فاصله‌ای معادل طول سازه (L) پس از سرریز، بیشترین استعداد را برای فرسایش داراست.

نیمرخ‌های بی‌بعد سرعت روی تاج و در بالادست سرریز خط جریانی با $\lambda = 0.5$ و به‌ازای دبی‌های مختلف در شکل (۱۱) ترسیم شده است. در این شکل سرعت روی تاج سرریز با سرعت معادل $\sqrt{2gh_1}$ و سرعت در بالادست سرریز با متوسط سرعت بالادست U_1 بی‌بعد شده است. مطابق شکل، نیمرخ‌های سرعت در بالادست سرریز به‌ازای تمامی دبی‌های مورد بررسی تقریباً یکسان است. اما روی تاج سرریز با وجود یکسان بودن روند تغییرات سرعت، با افزایش دبی جریان، بیشینه سرعت به سرعت معادل $\sqrt{2gh_1}$ نزدیک‌تر می‌شود. نیمرخ‌های بی‌بعد فشار روی تاج و بالادست سرریز، به‌ازای دبی‌های مختلف در شکل (۱۲) ترسیم شده است.

نیمرخ‌های تغییرات تنش برشی بستر در کف کانال و سرریز در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. تنش برشی بستر شاخصی برای بیان میزان نیروی جریان وارد بر بستر است که در مبحث انتقال رسوب دارای اهمیت است و پتانسیل فرسایش و رسوب‌گذاری با توجه به میزان این شاخص تعیین می‌شود. با توجه به شکل (۱۰)، مشاهده می‌شود که میزان تنش برشی بستر در بالادست سازه بسیار اندک است و این محل مستعد رسوب‌گذاری است. با شروع سرریز، مقادیر سرعت و به‌تبع آن تنش برشی بستر افزایش می‌یابد و این افزایش وابسته به میزان دبی جریان، تا بعد از تاج سرریز ادامه دارد و پس از آن دوباره کاهش یافته تا جایی که کمینه تنش برشی بستر روی سرریز، در انتهای سازه مشاهده می‌شود. پس از اتمام سازه سرریز، با توجه به کاهش چشم‌گیر انحنای خطوط جریان و افزایش سرعت جریان، تنش برشی افزایش یافته و بیشینه تنش برشی بستر در فاصله‌ای معادل L تا $2L$

شکل ۱۰. نیمرخ‌های بی‌بعد تنش برشی بستر به‌ازای دبی‌های مختلف در سرریز خط جریانی با $\lambda = 0.5$

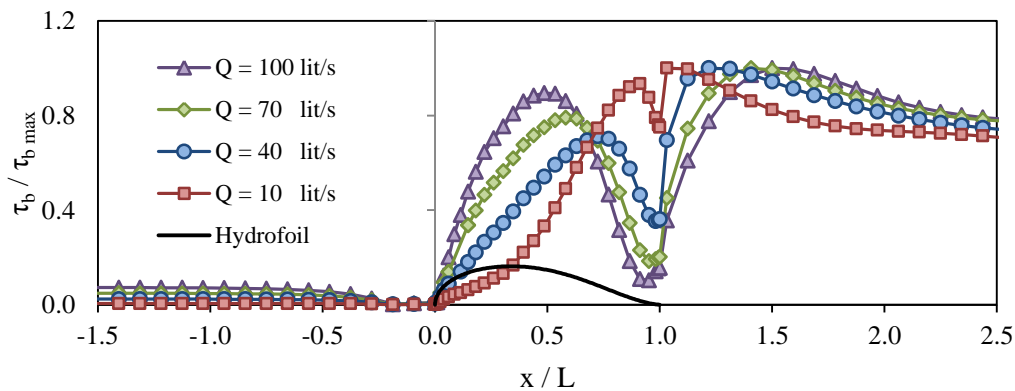


Fig. 10. Dimensionless bed shear stress profiles for a streamlined weir with $\lambda = 0.5$, for different flow discharges

شکل ۱۱. نیمرخ‌های بی‌بعد سرعت به‌ازای دبی‌های مختلف در سرریز خط جریانی با $\lambda = 0.5$ (الف) تاج سرریز (ب) بالادست سرریز

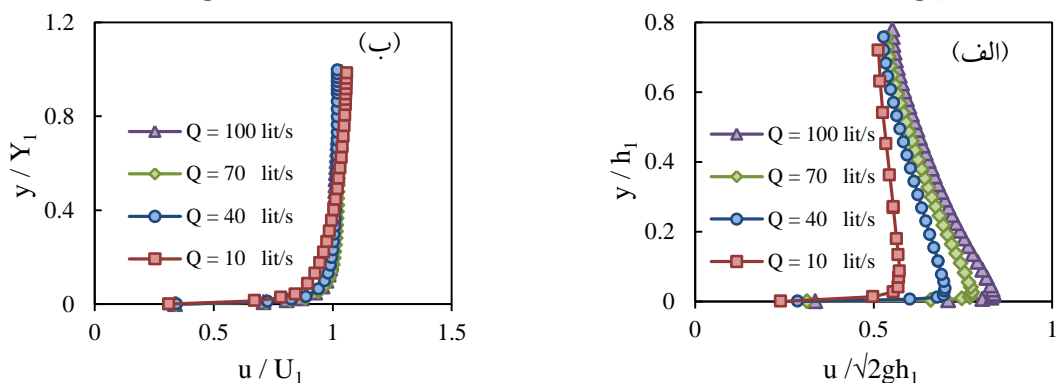


Fig. 11. Dimensionless velocity profiles for a streamlined weir with $\lambda = 0.5$, varying with the flow discharge (a) crest section and (b) upstream of the weir

شکل ۱۲. نیم‌رخ‌های بی‌بعد فشار به‌ازای دبی‌های مختلف در سرریز خط جریانی با $\lambda = 0.5$ (الف) تاج سرریز (ب) بالادست سرریز

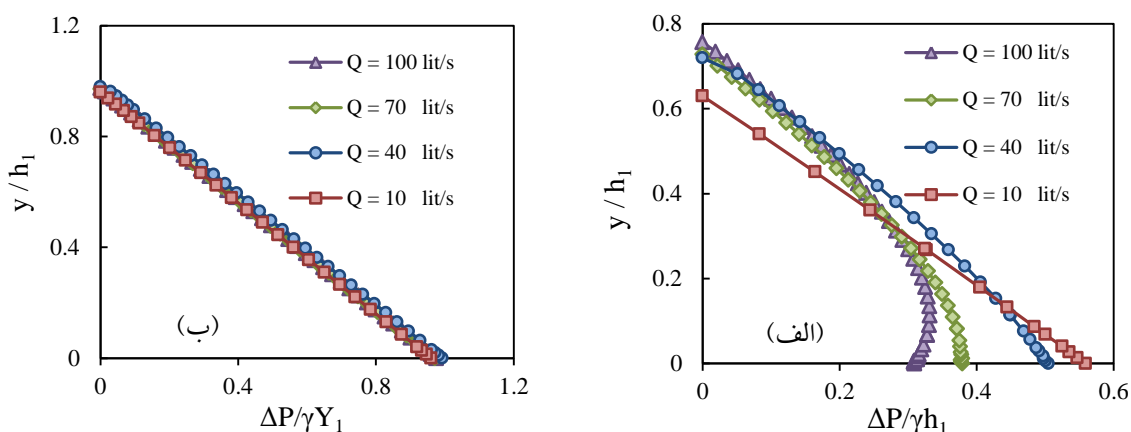


Fig. 12. Dimensionless pressure profiles for a streamlined weir with $\lambda = 0.5$, for different flow discharges (a) crest section and (b) upstream of the weir

همچنین توزیع نیم‌رخ‌های سرعت و فشار بر روی تاج و بالادست کاملاً مشابه نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های (۱۱ و ۱۲) است، با این تفاوت که با افزایش میزان خروج از مرکزیت نسبی λ ، بیشینه سرعت روی تاج افزایش و به تبع آن فشار کاهش می‌یابد و در نتیجه بیشینه سرعت و کمینه فشار روی تاج هر دو متعلق به سرریز تاج‌دایره‌ای ($\lambda = 1$) است. شکل (۱۳) تغییرات فشار کف بی‌بعد در طول کانال و سازه سرریزهای بررسی شده را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش میزان خروج از مرکزیت نسبی، دامنه تغییرات فشار بیشتر شده، به طوری که کمترین و بیشترین مقادیر فشار، هر دو متعلق به سرریز تاج‌دایره‌ای است. ایجاد فشارهای منفی و وقوع کاویتاسیون یکی از مهم‌ترین مشکلات رایج در سرریزهای مورد بهره‌برداری محسوب می‌شود. بر اساس نتایج این پژوهش، وقوع کاویتاسیون در سرریزهای تاج‌دایره‌ای بسیار محتمل‌تر از سایر سرریزهای خط جریانی است و در نتیجه بهره‌گیری از سرریزهایی با انحنای مناسب ($\lambda < 1$)، می‌تواند این مشکل را تا حدود زیادی برطرف نماید. همچنین به‌علت وقوع موج‌های ضربه‌ای، که در بخش آزمایشگاهی تنها در پایین‌دست مدل تاج‌دایره‌ای مشاهده شد، فشارهای مثبت، دامنه گسترده‌تری از پایین‌دست سرریز تاج‌دایره‌ای را فرا می‌گیرند پس این مشکل نیز در سایر انواع سرریزهای خط جریانی به میزان قابل توجهی مرتفع شده است.

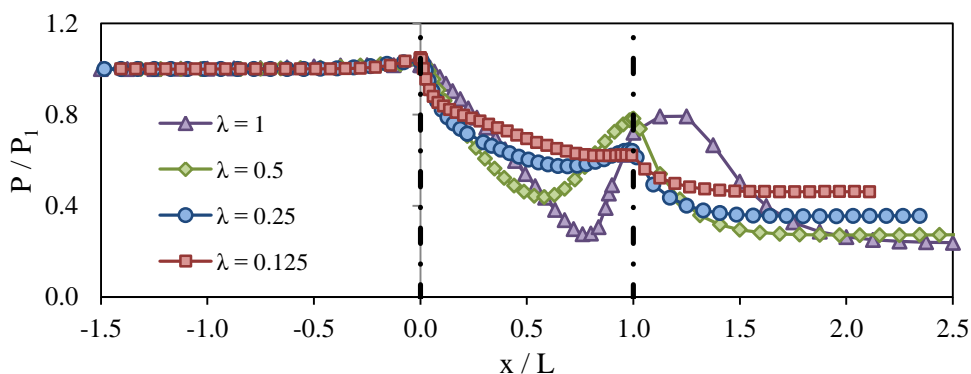
مطابق این شکل، توزیع فشار در بالادست سرریز هماهنگ بر توزیع فشار هیدرواستاتیک است و به طور کلی با چشم‌پوشی از اختلالات اندک ناشی از آشفتگی جریان، توزیع فشار در جریان‌های یکنواخت و متغیر تدریجی از توزیع خطی فشار هیدرواستاتیک تبعیت می‌کند. اما به‌علت وجود انحنای شدید روی تاج سرریز و به تبع آن تأثیر نیروی گریز از مرکز، نیم‌رخ فشار روی تاج سرریز به صورت غیرخطی است [18].

مطابق شکل (۱۲)، روی تاج سرریز در دبی‌های کم، نیم‌رخ تغییرات فشار تقریباً به صورت خطی و یا به عبارتی، هیدرواستاتیک است. اما با افزایش دبی جریان توزیع فشار روی تاج از توزیع فشار هیدرواستاتیک منحرف شده و نیم‌رخ تغییرات به صورت منحنی درمی‌آید. ضمناً هرچه دبی جریان و به تبع آن سرعت جریان افزایش می‌یابد، کمینه فشار روی سرریز کاهش می‌یابد.

در این بخش به منظور بررسی تأثیر هندسه سرریزهای مورد مطالعه، رفتار سرریزهای خط جریانی با خروج از مرکزیت‌های مختلف، به‌ازای دبی ثابت ۱۰۰ لیتر بر ثانیه ارزیابی می‌شود. ویژگی‌های جریان در سرریزهای مورد بررسی در جدول (۳) ارائه شده است.

نتایج بررسی نیم‌رخ‌های سطح آب و عدد فرود مشابه نتایج یاد شده در بخش‌های پیشین است و محل وقوع عمق بحرانی در تمامی سرریزها، اندکی قبل از تاج سازه واقع شده است.

شکل ۱۳. نیم‌رخ‌های بی‌بعد فشار کف در سرریزهای خط جریانی به‌ازای دبی ۱۰۰ لیتر بر ثانیه

Fig. 13. Dimensionless bed pressure profiles for different streamlined weirs, considering $Q = 100$ lit/s

جدول ۳. ویژگی‌های هیدرولیکی جریان‌های بررسی شده در سرریزهای خط جریانی به‌ازای دبی ۱۰۰ لیتر بر ثانیه

جدول ۳. ویژگی‌های هیدرولیکی جریان‌های بررسی شده در سرریزهای

خط جریانی به‌ازای دبی ۱۰۰ لیتر بر ثانیه

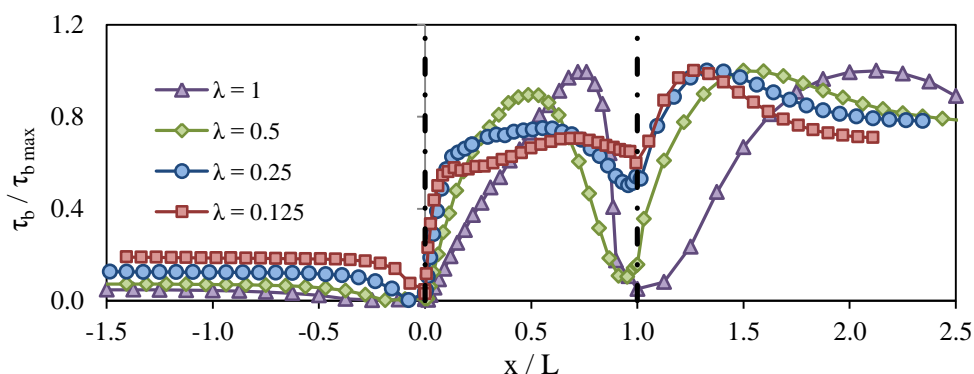
λ	Y_1 (cm)	Y_2 (cm)	Y_3 (cm)	Fr_1	Fr_2
1	42.3	16.5	10.1	0.29	2.49
0.5	38.6	17.5	10.6	0.33	2.31
0.25	33.0	18.9	11.8	0.42	1.97
0.125	28.4	19.5	13.2	0.53	1.66

Table 3. Hydraulic characteristics of flow over the streamlined weirs with $Q = 100$ lit/s

جریانی مستعد رسوب‌گذاری در بالادست خود است. همچنین مقادیر بیشینه تنش‌های برشی بستر که سبب فرسایش در پایین‌دست سازه می‌شوند، در سرریز تاج‌دایره‌ای دامنه وسیع‌تری را شامل می‌شوند. به‌طور کلی در سرریزهای خط جریانی با $\lambda < 1$ هدایت خطوط جریان عبوری از روی سرریزها به صورت یکنواخت‌تری انجام می‌شود و روند تغییرات نیروهای فشاری و تنش‌های برشی بستر، به ویژه در پایین‌دست این دسته از سرریزها، تقریباً یکسان است. اما در سرریز تاج‌دایره‌ای با $\lambda = 1$ و در فاصله $1 < x/L < 2$ مقادیر بزرگ نیروهای فشاری و در فاصله $x/L > 2$ مقادیر بزرگ تنش‌های برشی بستر مشاهده می‌شود. همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، دلیل این امر وقوع امواج ضربه‌ای، کاهش عمق و افزایش سرعت جریان در پایین‌دست سرریزهای تاج‌دایره‌ای است (شکل ۱۵).

شکل (۱۴) نیم‌رخ‌های بی‌بعد تنش برشی بستر، در سرریزهای خط جریانی را به‌ازای یک دبی ثابت نشان می‌دهد. نظر به این‌که تنش‌های برشی بستر با گرادپان سرعت در ارتباط هستند، در نقاطی که فشار کاهش و متعاقباً سرعت افزایش یافته است، مقادیر بزرگ‌تری از تنش‌های برشی بستر مشاهده می‌شود. با توجه به شکل (۱۴)، کمینه تنش‌های برشی بستر در بالادست متعلق به سرریز تاج‌دایره‌ای ($\lambda = 1$) است و در نتیجه این نوع سرریز بیشتر از سایر انواع سرریزهای خط

شکل ۱۴. نیم‌رخ‌های بی‌بعد تنش برشی بستر در سرریزهای خط جریانی به‌ازای دبی ۱۰۰ لیتر بر ثانیه

Fig. 14. Dimensionless bed shear stress profiles for different streamlined weirs, with $Q = 100$ lit/s

شکل ۱۵. مقایسه رفتار جریان عبوری از روی سرریز تاج‌دایره‌ای و سرریز خط جریانی با $\lambda = 0.25$ Fig. 15. Flow behavior over a circular-crested weir compared to that over a streamlined weir, with $\lambda = 0.25$

نیروهای فشاری در پایین‌دست سرریزهای تاج‌دایره‌ای رخ می‌دهند و در نتیجه بیشترین احتمال فرسایش در پایین‌دست این نوع از سرریزها قابل پیش‌بینی است. دلیل این امر وقوع امواج ضربه‌ای، کاهش عمق و افزایش سرعت جریان در پایین‌دست سرریزهای تاج‌دایره‌ای است. همچنین کم‌ترین مقادیر تنش‌های برشی بستر در بالادست سازه، مربوط به سرریز تاج‌دایره‌ای بوده و در نتیجه این نوع سرریز نسبت به سایر انواع سرریزهای خط جریانی مستعد رسوب‌گذاری در بالادست خود است. پس می‌توان اظهار داشت که بهره‌گیری از سرریزهای خط جریانی با انحنا مناسب ($\lambda < 1$)، می‌تواند مشکلات یاد شده را تا حدود زیادی برطرف نماید.

References

- [1] Bos M.G. 1976 *Discharge measurement structures*. International Institute for Land Reclamation and Improvement, ILRI, Wageningen, The Netherlands.
- [2] Matthew G.D. 1963 On the influence of the curvature, surface tension and viscosity on flow over round crested weir. *Proc. Inst. Civil Eng., ICE* 25(4): 511-524.
- [3] Montes J.S. 1970 Flow over round-crested weirs. *L'EnergiaElettrica*, 47(3): 155-164.
- [4] Hager W.H. 1985 Critical flow condition in open channel hydraulics. *ActaMechanica*, 54: 157-179.
- [5] Ramamurthy A.S. & Vo N.D. 1993 Application of Dressler theory to weir flow. *J. Appl. Mech.*, ASCE, 60(1): 163-166.
- [6] Chanson H. & Montes J.S. 1998 Overflow characteristics of circular weir: Effects of inflow conditions. *J. Irrig. Drain. Eng.*, ASCE, 124(3): 152-162.
- [7] Chunrong L., Aode H. & Wenju M. 2002 Numerical and experimental investigation of flow over a semicircular weir. *Acta Mech. Sinica*, 18(6), 594-602.
- [8] Bagheri S. & Heidarpour M. 2010 Overflow characteristics of circular-crested weirs. *J. Hydraul. Res.*, 48(4): 515-520.

۵- مراجع

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی جریان بر روی سرریزهای خط جریانی پرداخته شد. به‌منظور دست‌یابی به اهداف مطالعه و نیز ارزیابی مدل‌سازی‌های عددی، مدل‌های آزمایشگاهی مختلف سرریزهای خط جریانی بر اساس تابع تبدیل ژوکوفسکی طراحی و سپس با استفاده از ورق آهن گالوانیزه ساخته شدند و هریک در آزمایشگاه بررسی شدند. به‌منظور شبیه‌سازی جریان در سرریزهای مورد بحث از نرم‌افزار متن‌باز OpenFoam استفاده شد. برای تعیین بهترین مدل آشفتگی در شبیه‌سازی عددی جریان عبوری از روی سرریزهای خط جریانی، از پنج مدل آشفتگی k-ε استاندارد، k-ε قابل درک، RNG k-ε، SST k-ω و مدل تنش رینولدز LRR استفاده شد. نتایج حاصل، حاکی از آن بود که تمامی مدل‌های یاد شده، پارامترهای متوسط جریان را به خوبی برآورد می‌کنند. در نتیجه با توجه به سرعت همگرایی مدل‌های اجرا شده و توصیه‌های موجود در مورد هریک از مدل‌ها، مدل SST k-ω به عنوان بهترین مدل عددی در تحلیل جریان عبوری از روی سرریزهای خط جریانی انتخاب شد. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از مدل k-ω SST به‌ازای دبی‌های مختلف و خروج از مرکزیت‌های متفاوت، نشان داد که با افزایش دبی جریان و نیز افزایش میزان خروج از مرکزیت نسبی λ ، سرعت بر روی تاج سرریز افزایش و به‌تبع آن فشار در این محل کاهش می‌یابد. بر این اساس کم‌ترین فشار و در نتیجه بیشترین احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون متعلق به سرریز تاج‌دایره‌ای در دبی‌های بالا است. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین تنش‌های برشی بستر و

- [14] OpenFoam Foundation, *OpenFoam User Guide*. Version 2.1.0, 2011.
- [15] Hirt C.W. & Nichols B.D. 1981 Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J Comput. Phys.*, 39: 201-225.
- [16] Tennekes H. & Lumley J L. 1972 *A First Course In Turbulence*. The MIT Press, The Massachusetts Institute of Technology.
- [17] Davidson L. 2011 *An Introduction to Turbulence Models*. Department of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
- [18] Chow V.T. 1959 *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill, New York.
- [9] Kabiri-Samani A. & Bagheri S. 2014 Discharge coefficient of circular-crested weirs based on combination of flow around a cylinder and circulation. *J. Irrig. Drain. Eng.*, ASCE, 140(5): 04014010, 1-6.
- [10] Lakshmana Rao N.S. & Jagannadha Rao M.V. 1973 Characteristics of hydrofoil weirs. *J. Hydraul. Div.*, ASCE, 99(HY2): 259-283.
- [11] Anderson J.D. 1984 *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw-Hill, New York.
- [12] Oliver P.J. 2014 *Introduction to Partial Differential Equations*. Springer, New York.
- [13] Tannehill J.C., Anderson, D.A. & Pletcher, R.H. 1997 *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*. 2nd ed, Taylor and Francis Group, Washington, DC.

Hydraulic characteristics of flow over the streamlined weirs

S. Bagheri¹, A.R. Kabiri-Samani^{2*}

1- PhD. Student, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

2- Associate Prof., Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

akabiri@cc.iut.ac.ir

Abstract:

Weirs are types of the hydraulic structures that are used in water supply systems and irrigation channels for different purposes including; to increase the upstream water depth, to measure the flow discharge, to divert or evacuate the excess water flow from dams and open channels. Weirs are classified in three main groups as; sharp-crested-, short-crested-, and broad-crested weirs. The thickness of the crest results in different velocity and pressure profiles over the weir crest and consequently tends to various flow behaviors. The streamlined weirs are a type of short-crested weirs that are designed based on the theory of airfoils. This kind of weirs have some merits compared to the other types of weirs. These are; high discharge coefficient, stability and submergence limit as well as the least fluctuations of water free-surface profile. Despite the extensive studies have been carried out on the different types of short-crested weirs such as; circular-crested and overflow weirs, there are a lack of fundamental studies on the streamlined weirs, thus the flow characteristics over the streamlined weirs are still unknown.

The present study is subjected to numerical, and experimental simulation of hydraulic characteristics of flow over the streamlined weirs. Numerical simulations were performed using an open source OpenFoam software. Based on the objectives of the present study, to evaluate results of the numerical modeling, experimental investigation was also performed, applying different experimental models of streamlined weirs. The shapes of the experimental and the simulated numerical models were obtained based on the Joukowski transform function. To validate the numerical results, the numerical predictions of the free-surface profiles, the flow velocity profiles over the weir crest, and the bed pressure along the structures were compared to those of the model experimentation. Analyzing the results of different turbulence models including standard k- ϵ model, realized k- ϵ model, RNG k- ϵ model, k- ω SST model and Reynolds stress LRR model, indicated that the k- ω SST model is the most accurate numerical turbulence model for the determination of flow characteristics over the streamlined weirs. The results of the numerical simulations for different flow discharges and different geometrical characteristics, showed that, increasing the flow discharge and the relative eccentricity in Joukowski transform function, tends to increase the velocity and consequently to decrease the pressure over the weir crest. Therefore, the lowest pressure and the most probable potential of cavitation belongs to the circular-crested weirs with $\lambda = 1$ for relatively high flow discharges. Furthermore, the results showed that the greatest bed shear stresses and the compressive forces occur at the downstream end of the circular-crested weirs, thus the downstream zone of the circular-crested weirs is responsible to large values of bed erosion. This is partly due to the formation of shock waves, reduction of the flow depth and enhancement of the flow velocity downstream of the circular-crested weirs. Furthermore, the lowest bed shear stresses occur at the upstream end of the circular-crested weirs. Therefore, potential of sedimentation upstream of the circular-crested weirs increases. Accordingly, by employing streamlined weirs with $\lambda < 1$, and an appropriate curvature, unfavorable flow conditions would be removed, leading to a more safe and economic hydraulic structure.

Keywords: Streamlined weir, Joukowski transform function, OpenFoam software, Velocity profile, Pressure distribution.